

# 盾构管片环氧修补砂浆改性对盾构管片裂缝修复效果的提升研究

焦关宇

四川川交路桥有限责任公司 四川 广汉 618300

**【摘要】**：针对盾构管片裂缝修复中存在的粘结力弱、渗透性差等问题，本文研究改性环氧修补砂浆的配比设计及其性能提升机制。通过材料改性实验与工程试验段应用，验证了其在粘结强度、抗裂能力及适应复杂裂缝条件下的优越表现。结果表明，改性砂浆在提高修复质量与结构耐久性方面具有显著优势，为盾构隧道结构的高效修复与长期运营提供了有效技术支撑。

**【关键词】**：盾构管片；环氧修补砂浆；裂缝修复；材料改性；性能提升

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.010

## 引言

盾构法隧道施工广泛应用于城市轨道交通与地下工程，但管片裂缝问题日益突出，对结构安全与运营稳定构成威胁。常规修复方法存在粘结力不足、修复寿命短等问题，难以满足高标准隧道工程需求。为提升修复质量，研究改性环氧修补砂浆成为解决这一难题的关键路径。本文围绕改性修补材料的性能变化及其对裂缝修复效果的影响展开系统分析，为实际工程应用提供创新思路。

## 1 盾构管片裂缝问题及修复需求分析

### 1.1 盾构管片裂缝的形成机理与分布特征

盾构管片作为隧道结构中的主要受力构件，其长期处于复杂地质与应力环境中。管片裂缝多由多种因素耦合作用而成，其中包括地层不均匀沉降、盾构姿态控制不当、管片拼装偏差、混凝土自身干缩等。施工过程中盾构掘进产生的扰动应力会导致环向和纵向裂缝出现，尤其在洞门段、异形接头及转弯半径较小的区段更为集中。外部荷载变化如车辆荷载传递、地层沉降或水压波动，会在盾构管片结构中引起应力重新分布，导致已有微裂缝进一步扩展甚至产生新的裂缝。而地震荷载具有突发性和多向性，其瞬时高强度振动更易引发结构失稳，促使裂缝沿弱界面迅速扩展，形成复杂且不可控的裂缝网状系统，进而严重削弱管片的整体刚度、抗变形能力及长期服役性能，对隧道结构安全构成重大隐患。

从裂缝分布特征来看，多数裂缝呈现不规则走向，宽度通常集中在 0.1mm 至 0.3mm 之间，部分局部裂缝宽度超过 0.5mm，具有明显渗水隐患。微细裂缝多数分布在管片混凝土表层，易被忽视但却是耐久性下降的主要诱因。深层裂缝往往贯穿混凝土结构，严重削弱其整体稳定性。不同类型裂缝在成因、走向、深度和渗水特性等方面存在显著差异，结构性裂缝需具备高强度与粘结性的修复材料，而非结构性裂缝则更侧重柔性与渗透性能。因此，若无法准确识别裂缝的具体特征，盲目选用修补方式将导致修复效果不佳甚至出现二次损伤。只有深入掌握裂缝的形成机制、空间分布及演化趋势，才能制定科学的修复方案，并为修补材料的性能定向改性提供准确依据，

确保修复工作的针对性与可靠性。

### 1.2 现有裂缝修复技术的局限性分析

当前盾构管片裂缝修复主要依赖环氧树脂注浆、表面封闭、嵌缝灌浆等方法，虽在一定程度上缓解了裂缝发展，但修复效果受限于材料性能及施工环境。传统环氧修补材料粘结性能受潮湿环境影响较大，难以在含水或渗水裂缝中形成有效结合<sup>[1]</sup>。材料刚性大、收缩率高的问题易导致二次开裂，难以满足隧道长寿命与高耐久性的技术要求。部分低黏度环氧注浆材料虽然具备一定的流动性，但在实际应用中常因黏结力不足或颗粒尺寸较大，难以深入裂缝内部复杂的毛细微孔结构，特别是在宽度小于 0.1mm 的微细裂缝中，充填效果不理想。未能实现充分渗透会导致修补层与混凝土基体之间形成空隙，影响整体密实性与界面结合质量。随着荷载作用或环境变化，这些微小空隙可能逐渐发展为新裂缝，从而埋下结构安全隐患，降低修复效果的长期可靠性。

现有施工工艺对于裂缝判定的依赖较强，缺乏标准化、智能化的施工体系，修复质量较大程度上依赖人工经验，存在一定的不确定性。部分施工现场条件复杂，传统修复方法难以实现快速固化与高强度粘结，影响管片结构的即时承载能力恢复。当前盾构隧道裂缝修复面临多种复杂工况，如湿度大、裂缝窄小、结构受力状态不均等，对修补材料与施工方法提出更高要求。为实现高效、持久的修复效果，必须在材料配方方面引入功能化改性技术，如提高柔韧性、增强渗透性与抗裂能力；在施工工艺上优化注浆技术、固化控制与现场适应性操作流程。这类综合性技术突破关系到裂缝修复的质量，更直接影响盾构隧道的使用寿命与运维安全，亟待深入研究与工程推广。

### 1.3 对修复材料性能提升的工程需求

盾构隧道服役环境复杂，对修复材料的综合性能提出了更高要求。从工程角度看，修补材料需具备优异的粘结强度和耐久性，还应具备良好的渗透性、柔韧性以及抗化学侵蚀能力。面对微细裂缝及含水裂缝，材料需具备一定的湿附着力及微膨胀性能，以确保其能充分渗入裂缝内部并在固化后形成致密结构，有效阻止裂缝扩展和水分侵入。高温高湿等施工环境也要

求材料具备适应性强、施工简便、固化时间合理等特点,才能在现场复杂条件下保证修复质量与效率。

为满足上述技术需求,材料改性成为当前研究重点。在环氧砂浆中引入纳米硅粉、环氧增塑剂、界面活性剂或无机微填料等改性组分,可有效改善其流动性、抗裂性与力学性能,提升裂缝修复的稳定性与持久性。随着材料科学的发展,自愈合功能材料在基础设施中的应用潜力逐渐显现,特别是在盾构管片裂缝修复领域,其前景广阔。在修补砂浆中引入微胶囊、自修复聚合物或无机自愈颗粒,当裂缝再次出现或结构受损时,可触发材料内部的修复机制,自动封闭裂缝,阻断水渗与腐蚀路径。这种智能响应型材料能显著延长结构服役寿命,还可减少人工干预和养护成本,对提高城市隧道运行的安全性与智能化水平具有重要意义。

## 2 改性环氧修补砂浆材料性能研究

### 2.1 改性材料配比设计与实验方案

为提升盾构管片裂缝修补效果,需从材料本身入手对环氧修补砂浆进行科学改性。设计过程中考虑材料的功能化与复合化,引入纳米二氧化硅、活性微硅粉、聚羧酸减水剂和柔性改性剂等组分,使其具备更强的力学强度和适应性。基础配比以高性能环氧树脂为主剂,辅以一定比例的固化剂和填料,针对裂缝渗透性差、湿度大的现场环境,优化引入疏水性组分与界面增强剂,提高材料在湿润条件下的粘结能力。通过单因素法和正交试验法控制变量,开展系统化配比试验,寻找最佳组分比例。

实验方案依据不同裂缝修复需求,设置多组配比样本,分别测试抗压强度、劈裂抗拉强度、初始粘结强度、流动度及渗透性等指标,重点评估材料在模拟裂缝环境下的适应性。为验证其工程适用性,设计裂缝仿真试件模拟现场裂缝工况,采用人工切割预制不同类型裂缝并进行修复操作。全龄期强度测试和微观结构分析,评估改性环氧修补砂浆在不同龄期下的力学稳定性与界面结合质量,为后续性能提升机制与现场推广应用奠定数据支撑。

### 2.2 改性对砂浆粘结性能与渗透性的影响

在盾构管片裂缝修复中,材料对混凝土基底的粘结性能是决定修复效果的核心参数之一。改性后的环氧修补砂浆在粘结强度上表现出显著提升,得益于其界面活性增强剂的协同作用,可有效促进材料与混凝土毛细孔的结合,提高润湿性和浸润深度<sup>[2]</sup>。添加纳米级硅粉等填料在材料固化过程中形成致密结构,使得微观孔隙有效填充,提高材料的整体致密性与剪切强度,进而增强与母材的结合能力。多组试验数据显示,改性组的粘结强度平均提升幅度在20%以上,在干湿交替环境下仍保持良好的界面黏附稳定性。

渗透性方面,通过调控材料黏度与颗粒粒径分布,使修补

砂浆具备良好的流动性与毛细渗透性能。纳米组分与柔性填料的引入使材料具备一定的膨胀效应,有效推动其在裂缝内部深处扩散。实验中模拟微细裂缝宽度小于0.1mm的极限工况,改性砂浆仍可实现完全渗透,并在固化后形成连续致密结构,从而避免裂缝再次扩展或渗水问题。上述性能的协同提升,增强了修补效果,也提高了材料在复杂盾构隧道裂缝环境下的适应能力。

### 2.3 抗裂性能提升机制分析

环氧修补砂浆在改性后的抗裂性能表现出优异的工程适用性,其提升机制主要体现在材料的微观结构优化与应力释放能力增强方面。在配方中引入纳米硅粉与复合增强纤维,使得材料在硬化过程中形成致密且具有韧性的三维交联网络,有效抑制微裂缝的萌生与扩展。微观分析表明,纤维桥联效应和纳米颗粒的填充作用显著提高了材料的抗拉性能,提升了裂缝尖端的应力分散能力,延缓裂缝扩展进程。这种增强效果体现在初期抗裂表现上,也在材料长期服役过程中维持良好稳定性。

在裂缝环境下,材料抗裂性还与其收缩率和热膨胀系数匹配度密切相关。调控树脂与无机填料比例,改性环氧砂浆展现出更低的干缩变形与热变形反应,有效降低温度变化引起的内应力集中。柔性聚合物的引入使材料具备一定的变形能力,在地层扰动或荷载波动下仍能保持结构完整性。这一系列机制协同作用,构建了具有优异变形协调性与抗裂能力的高性能修补系统,为盾构管片裂缝长期有效修复提供了技术支撑。

## 3 改性修补砂浆在裂缝修复中的工程应用效果

### 3.1 试验段施工工艺与修复效果验证

为验证改性环氧修补砂浆在盾构管片裂缝修复中的实际应用效果,选取城市地铁盾构区间典型裂缝集中的隧道段作为试验区段。该段裂缝类型复杂,兼具干裂与渗水裂缝,裂缝宽度范围从0.1mm至0.6mm不等,具有较强代表性。施工过程依据裂缝形态与深度,选择低压注浆与表面封闭结合工艺进行修复操作。施工前采用裂缝测深仪、湿度计等设备精确评估裂缝特征,制定分层注浆与多点封闭修复策略,确保改性砂浆充分渗透并与混凝土基底形成高强结合界面。

修复过程中,施工队严格控制混合比例、注浆压力与温控条件,确保材料反应均匀、固化完全。固化后对修复区进行回弹强度测试及初步渗水检查,结果显示改性砂浆在实际裂缝中的充填效果显著,裂缝封闭完整,界面无空鼓与脱层现象。部分渗水裂缝在修复后实现长期干燥,验证了其优良的耐水性与封闭性。该试验段的成功实施证明改性环氧修补砂浆具备良好的现场适应能力,也为后续大范围推广提供了标准化施工参数和流程指导。

### 3.2 修复后结构性能的检测与评估

修复完成后,为全面评估盾构管片结构性能的恢复情况,

采用无损检测与破坏性试验相结合的方式系统性检测。重点监测指标包括表面完整性、渗透速率、界面粘结强度与抗压强度。利用超声回波法与红外热成像手段,对修复后的管片进行界面缺陷识别,确认材料与母体间的结合状态。回弹仪测试结果显示修复区域强度接近原始未损管片,部分区域强度提升幅度超过15%,说明改性材料具备较强的强度恢复与补偿能力。

在长期性能评估方面,布设应变计与裂缝扩展监测仪,连续跟踪修复后的应力分布与裂缝动态演化情况,观测周期达6个月。监测数据显示,修复区域在盾构隧道运营荷载作用下表现稳定,未出现新裂缝扩展,表明材料具备优异的耐疲劳性能与结构协调性<sup>[3]</sup>。进一步对修复结构取芯样进行劈裂抗拉和剪切强度测试,改性修补砂浆在结构承载路径中的力学表现良好,充分验证其能封闭裂缝,更能有效恢复盾构结构整体性能。

### 3.3 应用效果对比分析与技术推广价值

将改性环氧修补砂浆与传统环氧材料在实际应用中的效果进行对比发现,改性材料在裂缝封闭效率、渗水处理能力以及后期结构稳定性方面均表现出明显优势。传统材料在施工过程中易出现流动性不足与界面脱粘的问题,而改性材料由于其优异的润湿性与渗透性能,能够更充分填充裂缝空隙,显著减

少二次开裂风险。在多种裂缝类型修复案例中,改性材料的渗透修复成功率达到95%以上,远高于普通修补材料的78%,体现出其在复杂工况下的适应性与工程稳定性。

在技术推广价值方面,改性环氧修补砂浆兼具高性能与可操作性,适合在各类地铁、高速铁路、市政隧道等盾构结构中大规模应用。通过标准化配比、施工流程优化及现场操作简化,有效提升修复效率,降低人工干预带来的误差。结合物联网技术进行修复全过程信息化管理,实现材料使用量、注浆压力及固化状态的实时监控,提高了施工质量的可控性与可追溯性。该技术的成熟与推广将为我国隧道运维管理提供高效可靠的新路径,推动基础设施耐久性提升向智能化、精细化发展。

## 4 结语

本文围绕盾构管片裂缝修复难题,系统探讨了改性环氧修补砂浆在配比优化、性能提升及工程应用方面的研究路径与实践成效。研究表明,科学改性可显著提升材料的粘结性、渗透性与抗裂性能,实现在复杂工况下对盾构管片裂缝的高效、可靠修复。相关实验与试验段应用验证了该技术的工程适用性与推广价值,为城市隧道结构的长期安全运行提供了有力支撑。

## 参考文献:

- [1] 吴剑锋.盾构隧道磁性同步注浆材料研发及磁导控扩散机理研究[D].中南林业科技大学,2025.
- [2] 郭肖阳.隧道衬砌裂缝修复材料及修复性能试验研究[D].山东科技大学,2023.
- [3] 于晓东.地铁混凝土盾构管片裂缝防治技术研究进展[J].混凝土世界,2022,(06):32-37.